

AISI-1035 钢精冲成形与断裂的数值模拟

赵震¹, 谢晓龙¹, 谷胜光², 陈军¹, 李明辉¹

(1. 上海交通大学, 上海 200030; 2. 苏州东风精冲工程有限公司, 江苏苏州 215004)

摘要: 使用 DEFORM 2D 软件对 AISI-1035 钢的落料、冲孔精冲工艺进行了弹塑性大变形有限元数值模拟, 将 McClintock 断裂准则应用于精冲韧性断裂的预测中, 预测了材料变形过程中静水应力、等效应力和等效应变的分布以及发展趋势、精冲最后阶段微裂纹产生发展和最终断裂。

关键词: 精冲; 韧性断裂; 损伤; 塑性剪切带; 弹塑性有限元

中图分类号: O242.21; TG386.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-2168(2005)07-0013-04

Numerical Simulation of Fine-Blanking Shaping and Fracture of AISI-1035 Steel

ZHAO Zhen¹, XIE Xiao-long¹, GU Sheng-guang², CHEN Jun¹, LI Ming-hui¹

(1. Shanghai Jiaotong University, Shanghai, 200030, China;

2. Suzhou Dongfeng Fine-blanking Engineering Co. Ltd., Suzhou, Jiangsu 215004, China)

Abstract: Numerical simulation of the fine-blanking process for AISI-1035 steel which contains elastoplastic large deformation is conducted with the software DEFORM 2D. The McClintock ductile fracture criterion is used to predict ductile fracture in the fine-blanking process. The distribution and developing trend of the hydrostatic stress, equivalent stress and equivalent strain in the course of deformation of the material, and the emergence, development and final fracture of the fine cracks in the final fine blanking process are predicted.

Keywords: fine-blanking; ductile fracture; damage; plastic shearing band; elastoplastic FEM

1 引言

精冲是在普通冲压基础上发展起来的一种先进的金属精密成形工艺, 在工业化国家, 精冲技术已广泛应用于汽车制造、航空器制造、通用机械等各工业部门。使用精冲技术可以获得尺寸精度高、冲裁面光洁、翘曲小且互换性好的优质零件, 可以减少甚至取消校平、磨削等后续加工, 以较低的成本达到产品质量的改善与生产效率的提高。

精冲成形过程非常复杂, 材料在狭窄的凸、凹模间隙附近形成了局部塑性剪切带, 在压应力的作用下产生强烈的塑性流动, 应力应变梯度很大, 是一个经历弹性变形、塑性变形和剪切断裂的非稳态大变形过程, 对其变形机理的研究仍处于不断的探

索中。传统的剪切过程其研究方法都是依靠大量的实验和简单的力学分析, 找出某种经验或者是半解析公式, 用来计算力能参数^[1]。塑性成形仿真技术的发展为研究精冲成形机理并从而预测产品成形缺陷、优化工艺参数提供了新途径。现通过 DEFORM 2D 软件, 对 AISI-1035 钢的落料冲孔精冲工艺进行了数值模拟, 成功预测了材料变形过程中静水应力、等效应力和等效应变的分布以及发展趋势、精冲最后阶段微裂纹产生发展和最终断裂的全过程。

2 弹塑性有限元理论基础

在精冲过程中会出现大位移、大转动以及大应变, 因此使用大变形弹塑性有限元求解比较合适, 更新的拉格朗日(U.L.)有限元方法, 能够较准确地模拟精冲塑性大变形中应力、应变的分布及发展趋势。U.L. 法将最后一个已知的平衡状态(t 时刻)作为参考构形, 去求解 $t + \Delta t$ 时刻物体的各个未知量。用 U.L. 表示的虚功方程为^[2]:

作者简介: 赵震(1972-), 男, 上海人, 副教授, 从事精冲成形工艺设计与数值模拟、冲模智能设计技术研究, 地址: 上海市华山路 1954 号上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心。电话: (021)62813430-8116, E-mail: zzhao@situ.edu.cn

收稿日期: 2004-12-15

$$\int_{t_0}^{t+\Delta t} S_{ij} \delta_t^{t+\Delta t} E_{ij} dV = \delta_t^{t+\Delta t} W \quad (1)$$

式中 S_{ij} —— $t + \Delta t$ 时刻参考于 t 时刻构形的

Kirchhoff 应力张量

E —— $t + \Delta t$ 时刻参考于 t 时刻构形的

Green 应力张量

$\delta_t^{t+\Delta t} W$ —— 等效载荷矢量

经过离散化, 引入位移形函数, 得到最终的平衡方程:

$$({}_t K_\sigma + {}_t K_0) \{\Delta \alpha\} = {}^{t+\Delta t} Q - {}_t F \quad (2)$$

式中 ${}_t K_\sigma = \int_{t_0} [\frac{\partial N}{\partial x}]^T [\sigma] [\frac{\partial N}{\partial x}] dV$ —— 线性应变增量

刚度矩阵

${}_t K_0 = \int_{t_0} {}_t B^T {}_t D {}_t B dV$ —— 非线性应变(几何或

初始应力)

${}_t F = \int_{t_0} {}_t B^T \sigma dV$ —— t 时刻单元应力结点等效

矢量

方程(2)为 DEFORM 软件中用 U.L. 方法描述的大变形弹塑性有限元方程。

3 韧性断裂准则

精冲过程中撕裂带和断裂带高度对精冲产品质量有很大的影响, 因此, 对韧性断裂(ductile fracture)的预测就变得非常重要。韧性断裂在金属成形过程中表现为宏观裂纹的形成和发展最终导致材料的破坏^[3]。从微观角度来说, 韧性断裂过程伴随着微观空穴的长大和聚合, 直至许多空穴聚集在一起产生裂纹。基于微观的断裂准则可以将空穴的几何参数在材料的本构方程中加以描述, 可以分析断裂过程中裂纹形成、发展的微观变化。根据它分析的空间尺度和对象, 属于连续损伤力学范畴, 它旨在利用连续介质力学的方法研究具有微观结构固体变形及破坏行为^[4]。

具有代表意义的模型有 Gurson 模型、Lemaitre 模型、Rousselier 模型、McClintock 模型以及 Rice 和 Tracey 模型等, 其中 McClintock 模型揭示了静水压力和等效应变是影响空穴扩张的主要因素, 提出了如下韧性断裂准则:

$$\int_0^{\epsilon_f} \left[\frac{2}{\sqrt{3}(1-n)} \sin h \left\{ \frac{\sqrt{3}(1-n)}{2} \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{\bar{\sigma}_e} \right\} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\bar{\sigma}_e} \right] d\bar{\epsilon} = K \quad (3)$$

其中 K 为出现微裂纹的临界损伤值; σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力; $\bar{\sigma}_e$ 为等效应力; ϵ_f 、 $\bar{\epsilon}$ 分别为断裂应变和等效塑性应变; n 为材料硬化系数。

在本文的模拟中, 采用了 McClintock 韧性断裂准则来判断裂纹是否出现, 临界损伤值 K 的确定参考了文献^[5]中精冲实验的结果, 确定为 0.2, 能基本满足模拟的需要。在材料破坏准则选取之后, 与之相配合的就是怎样在有限元程序中应用该准则, 实现材料断裂分离的模拟^[6]。裂纹扩展的表示方法有单元删除法、节点分离法和单元分裂法, DEFORM 采用了单元删除法来处理失效破坏的单元^[7], 一旦某个单元形心处的损伤达到其临界值, 就认为该单元破坏, 将其取掉, 并进行相应的结点处理, 继续计算^[5]。

4 精冲有限元模型的建立

以 AISI-1035 钢的冲孔、落料复合精冲工艺为例, 模拟了从齿形压边圈压入板料、材料发生精冲剪切直至板料发生韧性断裂的全过程。材料厚度为 5mm, 模具工作部分分为压边圈、落料凸模、冲孔凸模、凹模、上反顶器、下反顶器。有限元模型采用二维轴对称模型, 单元类型为四节点等参单元, 为防止剪切过程中网格的过度畸变, 整体网格每计算 2 步进行 1 次再划分, 保证了计算的顺利进行。由于精冲是一种典型的局部塑性大变形过程, 变形区仅仅局限在狭窄的凸、凹模间隙附近和齿圈作用部分, 因此在划分网格时, 将间隙附近和齿圈作用部分的网格细化, 其他部分网格稀疏, 这样既可以保证计算精度, 又可以节省计算时间。有限元模型如图 1 所示。

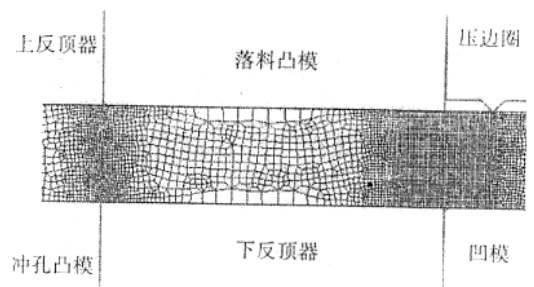


图 1 落料冲孔精冲工艺有限元模型

通常情况下精冲凸模的下压速度不超过 50mm/

s, 所以其剪切过程可视为准静态过程, 可忽略加速度、应变速率、温度的效应。因此, 材料的本构关系采用了流动应力与应变率、温度无关的硬化材料模型:

$$\bar{\sigma} = c \bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

AISI - 1035 钢杨氏模量为 2×10^5 , 泊松比为 0.3, 初始屈服极限 700MPa, 硬化指数为 0.15。

表 1 为数值模拟使用的模具尺寸以及工艺参数。

表 1 精冲工艺参数

工艺名称	工艺参数
冲裁间隙/mm	0.04
冲孔、落料凸模圆角半径/mm	0.1
凹模圆角半径/mm	0.3
材料厚度/mm	5
压边力/kN	250
反顶力/kN	150
凸模压入速度/mm · s ⁻¹	10
摩擦因数	0.1

5 模拟结果及讨论

5.1 齿形压边圈压入过程分析

图 2 为齿形压边圈压入板料 0.4mm 时的材料等效应力分布, 从图中可以看出, 齿圈下的金属受到压缩, 产生局部的塑性变形, 塑性变形区域仅限于与齿圈接触的部分, 材料其它部分只发生弹性变形, 为后续的剪切变形提高了压应力, 有利于塑性变形的顺利进行。

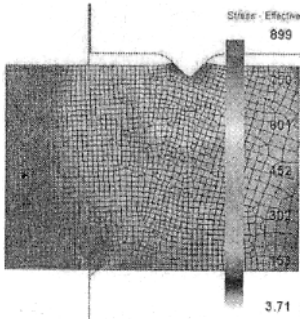


图 2 齿圈压入 0.4mm 时 $\bar{\sigma}$ 分布图

5.2 塑性剪切过程分析

图 3 至图 5 为精冲剪切过程中不同变形程度时的等效应力和等效应变示意图, 从图中可以看出, 变形过程中零件与板料始终联为一体, 塑性滑移产生新的光亮表面。拉应力和剪应力是造成金属材料

断裂破坏的主要因素, 而当材料变形区处于三向压应力状态时, 可以增大材料的塑性, 从而可以抑制精冲过程中出现弯曲、拉伸和撕裂现象。

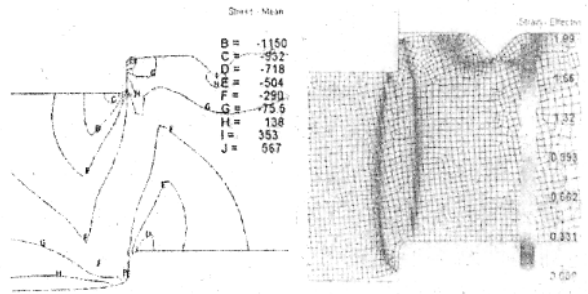


图 3 压下量为 1mm 时变形区的 σ_m 和 $\bar{\epsilon}$ 分布

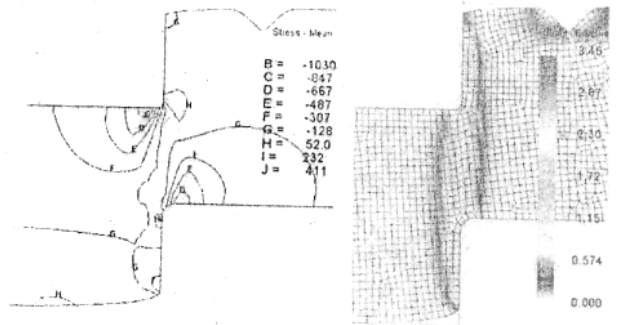


图 4 压下量为 2.5mm 时变形区的 σ_m 和 $\bar{\epsilon}$ 分布

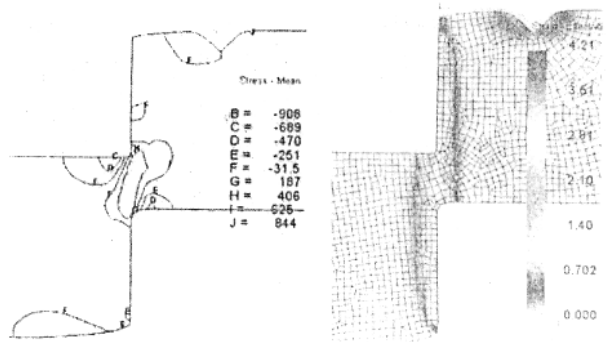


图 5 压下量为 3.5mm 时变形区的 σ_m 和 $\bar{\epsilon}$ 分布

从精冲变形区静水压力的发展来看, 在精冲剪切开始阶段, 静水压力为负值的区域很大, 并且其数值很大, 这说明在变形阶段的初期, 压边圈、反顶器施加的压力非常合理, 为材料的大塑性变形创造条件。随着变形程度的增加, 变形区内静水压力的值开始变小, 但仍然保持负值, 从而保证了精冲剪切的顺利发展, 而不出现裂纹。从图中等效应变的分布可以看出, 材料的塑性变形区域主要集中在狭窄的凸、凹模间隙及其附近区域, 形成了局部的塑性剪切

带,而在其它区域塑性变形几乎为 0。等效应变的最大值出现在凹模圆角处,这是由于在圆角处圆弧、直线交替引起的曲率半径变化导致了金属流动不均匀的结果。

5.3 韧性断裂过程分析

图 6 为凸模行程为 88% 材料厚度时,凹模附近产生了微裂纹。这是由于在精冲的最后阶段,凹模圆角处的材料会承受拉应力,首先达到抗剪强度,达到韧性断裂准则的临界值,从而出现裂纹。模拟中微裂纹出现的位置与文献^[8]中的实验结果一致。

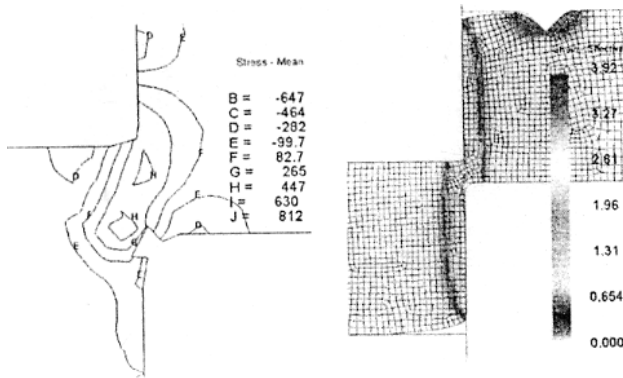


图 6 压下量为 4.4mm 出现裂纹时变形区的 σ_m 和 ϵ 分布

5.4 压力行程曲线

图 7 为数值模拟获得的落料凸模和冲孔凸模的冲裁力—时间曲线,变化趋势与文献 [9] 中的精冲力形成曲线基本一致。从曲线可以看出,冲裁力在剪切开始阶段变化较快,板料从弹性变形转入塑性变形。随着变形程度的不断加大,虽然板料承受剪切力的有效面积在减小,但材料硬化作用加强,冲裁力不断增大,直至达到最大剪切力。从图中可以看出,落料和冲孔凸模的剪切力几乎在同一时间达到最大,然后由于承受剪切力的有效面积下降的影响超过了材料硬化对冲裁力的影响,冲裁力开始平缓下降,没有出现普通冲裁由于断裂出现过早而产生的冲裁力急剧下降的现象。

6 结束语

利用大变形弹塑性有限元对 AISI-1035 钢的落料、冲孔精冲工艺进行了模拟,并将 McClintock 断裂准则应用于精冲韧性断裂的预测中,模拟从齿圈压入、材料塑性剪切、精冲最后阶段微裂纹产生发展和最终断裂的全过程,预测了材料变形过程中静

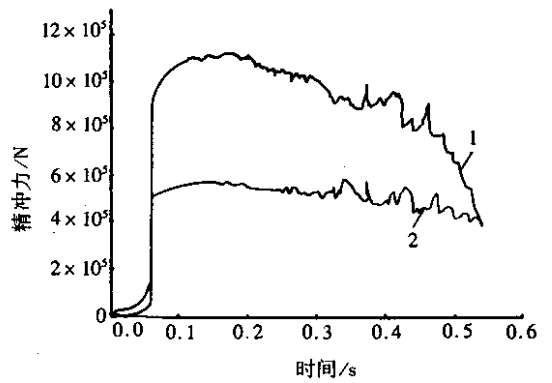


图 7 落料凸模和冲孔凸模的冲裁力—时间曲线

1. 落料精冲力 2. 冲孔精冲力

水应力、等效应力和等效应变的分布以及发展趋势。因此,可以通过 DEFORM 软件,利用大变形弹塑性有限元预测产品成形缺陷,优化工艺参数。此外,传统的精密冲裁力计算方法由于未考虑零件几何形状、剪切边状态、冲裁间隙、润滑等因素的影响,计算误差较大。通过模拟,能够较准确地预测成形过程中的载荷分布变化趋势,指导工艺和模具设计。

参考文献:

- [1] 王凤辉,卢建霞,李龙海,等.平行刃剪切机剪切过程的有限元仿真模拟分析[J].塑性工程学报,2003,10(2):18~24.
- [2] 彭颖红.金属塑性成形仿真技术[M].上海:上海交通大学出版社,1998.
- [3] 李昱明.基于空穴损伤和韧性断裂的精冲成形过程的三维有限元仿真技术研究[D].上海交通大学,2001.
- [4] 李国琛,耶纳 M.塑性大应变微结构力学[M].北京:科学出版社,1998.
- [5] 贾建军,彭颖红,阮雪榆.精冲过程的韧性断裂[J].上海交通大学学报,1999,33(2):181~183.
- [6] 方刚,曾攀.金属板料冲裁过程的有限元模拟[J].金属学报,2001,37(6):653~657.
- [7] DEFORMTM2D Verson8.0 manual SFTC 2004.
- [8] 黄毅宏,黎厚芳,简智彪.精冲工艺及其机理探讨[J].中国机械工程,1994,5(5):57~59.
- [9] K Lange, F Birzer, P Hoefel, et al. Cold Forming and Fineblanking, A handbook on cold processing, material properties, component design [M]. Verlag Hallwag AG, Bern/Schweiz, 1997.